

# 風力発電所のシャドウ影響評価のための基礎的研究

## A Basic Study for the Shadow Impact Evaluation of Wind Power Plants

宇田紀之・清水幸丸

UDA Noriyuki & SHIMIZU Yukimaru

**Abstract:** Shadow impact problem on wind power site is growing even in Japan. In this study, the impacted duration and impacted time at first were calculated on the sun orbit model. Next time, by synthesizing the shadow image produced by CAD soft and DEM data from Google Earth. On this method, the impacted shadow range was easily visualized and was uploaded onto the Google Earth. This method made it possible for the residents surrounding wind power site to share the data of wind power plant design through internet.

**Keywords:** Wind power, Shadow calculation, Impact evaluation, Google Earth

### 1. はじめに

太陽の光が、建物や樹木に遮られて地面に作られた影を日影といい、居住地においては住民の住環境や心の落ち着きに影響を与えるとされる。建物が周辺地区に及ぼす日影の程度は、建築基準法によって規制されている。近年、二酸化炭素を排出しないクリーンエネルギー源として開発が進む風力発電の施設において、この日影問題が注目されるようになってきた。

風力発電機の特徴は、ロータの回転運動にある。風力発電機の回転面と太陽光が重なった場合、地表に断続的な明暗コントラストが投影されることがある。これをシャドウ・フリッカー現象という。シャドウ・フリッカーは、周辺住民において吐気や眩暈などの健康被害を引き起こすとされる。(以下、風力発電機に特徴的な日影現象をシャドウとする。)

日本のような低緯度地域では、シャドウ影響は軽微であると考えられていた。しかし、発電機の大型化や、発電サイトの住宅地への接近などの最近の傾向によりシャドウ問題が顕在化してきた。現在、開発の主力である 2000kw 級の風力発電機は、ハブ高 60m 以上、回転面直径 80m 以上の巨大な建築物で、

周辺地域に大きなシャドウを落とす。シャドウの発生は、太陽と発電機の位置関係によって決まるが、風向・風速・日射量などの気象条件、及び、周辺地形によっても影響を受け、規模や形状、明暗コントラスト比が変化する。風力発電機周辺の住宅地において、実際の程度のシャドウ影響が発生するのかを明らかにすることは、風力発電サイト開発の環境影響評価において、重要なポイントとなると考えた。

本研究では、まず、太陽赤緯モデルにもとづいて、風力発電機のシャドウ・キャストイングを試みた。これにより、任意地点におけるシャドウ影響時間を計算することができた。次に、シャドウ・イメージを Google Earth の提供する地表面データ (DEM) に合成して影響範囲を視覚化する方法を提案した。Google Earth を環境影響の視覚化技術として利用することにより、インターネットを通じた情報公開と環境影響評価へのネット参加の可能性が生まれた。

### 2. シャドウ影響評価に関する研究

#### 2.1 風力発電所のシャドウ問題について

日照時間の長くなる北欧では、商用風力発電開発が始まった 1990 年代後半から、シャドウ・フリッカ

一現象が重大な環境影響問題のひとつとして認識され、研究が行われてきた。デンマークでは、発電機との間に保持すべき距離をハブ高の6倍、年間影響時間を20時間以内とする風力発電機の設置基準がある。日本では、シャドウ影響は軽微であると考えられていたため、シャドウ影響の問題は議論されてこなかった。2007年頃から、環境影響問題に関わって、風力発電機のシャドウ・フリッカー問題が注目されるようになってきた。

建築物の日影影響評価では、方位・距離・時間をパラメータとする日影曲線が用いられる。図面に住宅位置をプロットすると、日影を受けるおおまかな時期と時間を知ることができる。日影の影響範囲は、太陽位置（方位角と高度角）が、地平座標における太陽赤緯が近似式から計算可能であることから、最近の主要な建築用CADは、日影計算機能を標準機能に組み込んでいる。これをシャドウ影響評価に利用することが可能である。

ただし、風力発電機のシャドウ影響評価の難しさは、風況によってロータ回転面方向や回転速度が変わり、回転運動する時間も不規則であることにある。シャドウ・フリッカー現象は、日出・日没の時間帯に発生するが、太陽方位と回転面が重なったとしても、必ずしもフリッカー現象が発現するというものでもない。通常建築物と異なり、シャドウのサイズや形状や発現時間に不確定な要素が多いのが風力

発電機のシャドウ特性を考慮した評価方法と規制の基準が考察されるべきである。

## 2.2 シャドウ影響評価モデル

風力発電機は、タワー上部に発電機（ナセル）と回転翼（ブレード）を持つ（図1）。ロータ回転面のシャドウは、発電機直下から若干離れた位置に楕円形となって投影される。周辺の地理的条件や気象条件によってシャドウが認識されない場合もある。地理情報システム（GPS）を利用したシャドウ影響マップの作成は、Kinderらによって行われた。張らは、発電機位置、観測位置、時間を入力値としたシャドウ・シミュレーションのアルゴリズムを紹介している。WIND Engineersは、風向・風速・日照量などの気象条件を考慮したシャドウ・フリッカー予測モデルを提案し、影響予測の計算サービスをネット上に公開している。

シャドウ影響を考える場合、太陽位置をどのように定義するかが問題である。特に、低緯度地域のシャドウ・フリッカー現象は短時間の現象であるので、分単位の影響時間を保証する精度が求められる。シャドウ影響時間は、生活時間との関係において環境影響を評価するうえでも重要な評価尺度である。シャドウ影響範囲の計算では、計算結果を地形データ上にシャドウ・イメージを投影して影響範囲を視覚化することが望ましい。

## 3. シャドウ影響時間の計算

建築物の位置と3次元形状データを入力して日影の大きさと形状を計算で、地表面座標に投影する技術をシャドウ・キャスティングという（図2）。これは、任意地点（緯度 $\phi$ 、経度 $\lambda$ ）と任意時刻 $\theta$ における太陽の方位角 $\alpha$ と高度角 $\beta$ が、時角・赤緯系モデルによって計算できることによる。発電機のシャドウを作成し、XY平面に投影する。任意地点がそのシャドウのなかに含まれるかどうかによって影響を判定することができる。時刻 $\theta$ を変化させて、影響時間を求める。

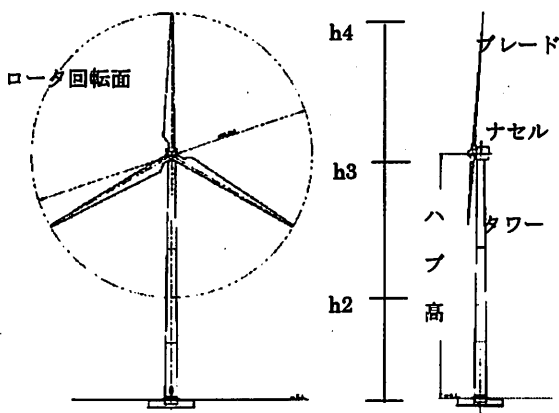


図1：風力発電機の外形図

発電機の特徴である。建築基準法の評価方法をそのまま、風力発電機にあてはめるのは適当でない。

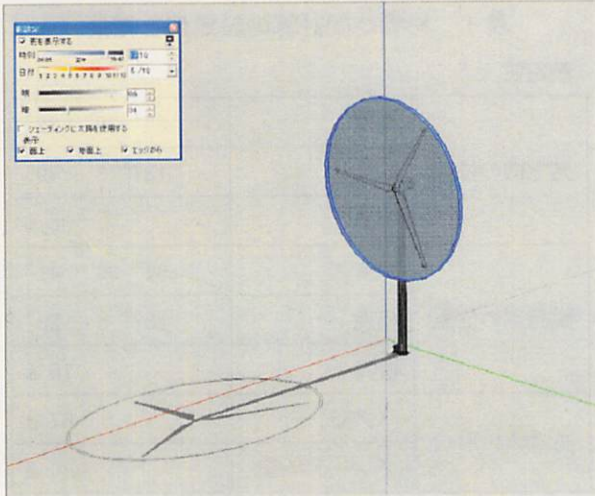


図 2：風力発電機のシャドウ・キャスティング

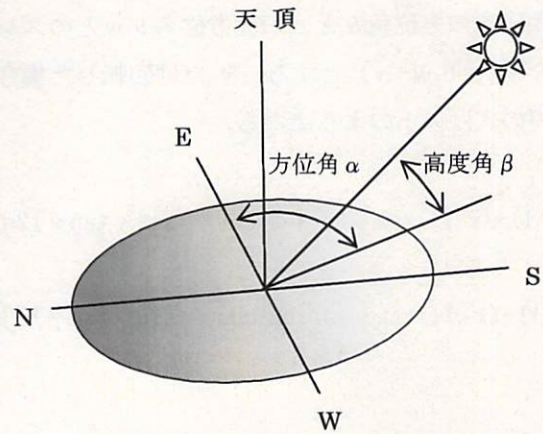


図 3：太陽の方位角  $\alpha$  と高度角  $\beta$

### 3.1 太陽の方位角と高度角の計算

任意時刻の太陽の方位角  $\alpha$  と高度角  $\beta$  は、地平座標系における太陽の赤緯  $\delta$  と時角  $\tau$  を計算で求め、発電機設置地点の緯度  $\phi$  を介して換算する (図 3)。計算方法は、まず、任意時刻  $\theta_0$  を、該当日の間通し日数  $N_d$  に基づいて換算する。

$$\theta_0 = 2\pi (N_d - 1) / 365$$

任意時刻  $\theta_0$  における太陽赤緯  $\delta$  は、次の近似式で計算する。

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006918 - 0.399912 \cos \theta_0 + 0.070257 \sin \theta_0 \\ & - 0.006758 \cos(2\theta_0) + 0.000907 \sin(2\theta_0) - 0.002697 \cos(3\theta_0) \\ & + 0.001480 \sin(3\theta_0) \end{aligned}$$

均時差  $E_q$  は以下の式による。

$$\begin{aligned} E_q = & 0.000075 + 0.001868 \cos \theta_0 - 0.032077 \sin \theta_0 \\ & - 0.014615 \cos(2\theta_0) - 0.040849 \sin(2\theta_0) \end{aligned}$$

JST は日本標準時間として、太陽の時角  $\tau$  は、次式で計算する。

$$\tau = (\text{JST} - 12) \pi / 12$$

$$+ \text{標準子午線からの経度差} + \text{均時差}(E_q)$$

標準子午線からの経度差は、 $134 - \text{経度 } \lambda$  である。太陽の方位角  $\alpha$ 、高度角  $\beta$  は、赤緯  $\delta$  と時角  $\tau$  と緯度  $\phi$  から次のように計算する。

$$\alpha = \sin^{-1} \{ \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \tau \}$$

$$\beta = \tan^{-1} [ \cos \phi \cos \delta \sin \tau / \{ \sin \phi \sin \alpha - \sin \delta \} ]$$

### 3.2 シャドウ影響の判定式

軸方向を北方向とする  $XY$  座標面を投影面として、原点に発電機を置く。まず、太陽とブレード回転面は正対すると仮定する。太陽高度角  $\beta$  が低い場合、回転面のシャドウは太陽方位角  $\alpha$  の反対方向に伸びる楕円となる。そのシャドウ楕円の中心を  $(X1, Y1)$  とすると、楕円の式は

$$(x - X1)^2 / a^2 + (y - Y1)^2 / b^2 = 1$$

となる。ここで、 $a$ 、 $b$  は楕円の長軸、短軸、 $R$  がブレード半径である。

$$a = R \cot \beta$$

$$b = R$$



風向を角度  $\theta_w$  とすると、回転面の方位も  $\theta_w$  になる。太陽光の方位角  $\alpha$  と回転面方位角  $\theta_w$  とのズレ角度を  $\gamma$  ( $=\theta_w - \alpha$ ) とする。 $\gamma$  だけ回転した場合の楕円の式は以下になる。

$$\begin{aligned} & \{(x-X1)+(y-Y1)\tan\gamma\}^2/\{a^2(\cos\gamma+\sin\gamma\tan\gamma)^2\} \\ & + \\ & \{(y-Y1)-(x-X1)\tan\gamma\}^2/\{b^2(\cos\gamma+\sin\gamma\tan\gamma)^2\} \\ & =1 \end{aligned}$$

これを  $\gamma$  補正とする。

任意観測点 P の座標 (X2, Y2) が、この楕円に含まれているかどうかによって、観測点におけるシャドウ影響を判定する。

### 3.3 シャドウ影響の期間と時間の計算

愛知県田原市の渥美風力発電所(渥美グリーンパワー)の発電機1機を対象にして、シャドウ影響時間の計算を行った。計算の入力値と結果を表1に示す。観測点は、発電機の北西 650m 地点の住宅とした。まず、太陽と回転面との正対を仮定して、10 分間単位の ON/OFF 判定によって影響を受ける期間と時間帯を求めた。その結果、2009 年度では、冬至を境に、平成 2008 年 10 月 29 日から 11 月 26 日 (29 日間) と、平成 2009 年 1 月 17 日から 2 月 14 日 (29 日間) の 2 回シャドウ影響の期間があることが分かった。影響時間帯は、いずれも、午前 7 時から 8 時の間であった。

次に、時間幅を 1 分間にして該当日ごとのシャドウ影響時間を求めた。シャドウの影響時間合計は、40.25 時間になった。観測地近隣の渥美測候所における風向データ 10 年分を使用して、回転面のズレ角度  $\gamma$  を求め、シャドウ影響期間と影響時間の補正をおこなった。これにより、シャドウ影響日数は、58 日から 34 日に減少し、影響時間合計も 18.09 時間に

表 1：影響時間計算の設定値と結果

設定値

発電機の位置	緯度	34° 36' 32"
	経度	137° 5' 49"
	標高	36 m
観測点の位置	緯度	34° 36' 41"
	経度	137° 5' 28"
	標高	15 m
発電機の形状	ハブ高	67 m
	ブレード半径	40 m

計算結果

	太陽正対モデル	風向によるズレ補正
影響日数	58 日	34 日
影響時間合計	40.33 時間	18.09 時間

減少した。平成 21 年 1 月 22 日、現地観測点において、太陽位置とシャドウ投影位置がほぼ計算通りであることを確認した。

## 4. シャドウ影響範囲の計算と表示

本研究では、シャドウ影響範囲の表現方法として Google Earth を利用する方法を提案する。付属の 3 次元 CG ソフト (SketchUP6) で作成した発電機モデルとシャドウ・イメージを Google Earth の提供する標高付きの地表面データ (DEM) に合成して、サーバにアップロードする。インターネットを通じた情報共有と情報公開の可能性が生まれる。シャドウ・イメージを生成する CAD ソフトは、Google Earth との連携性の高い SketchUp を使用する。

### 4.1 Google Earth を利用した表示と共有

Google Earth からダウンロードした地形データに、XY 座標で投影したシャドウ・イメージをマップしてシャドウ影響範囲を表示したのが、景観画像 (図 4) である。発電機と観測点との中間に存在する小山 (標高 37m) によってシャドウが変形する様子を確認することができる。

Google Earth を利用する利点のひとつは、表示設

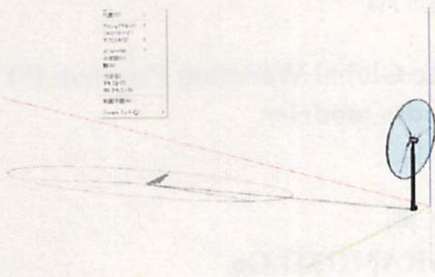


図 4.1 計算結果にもとづくシャドウ



図 4.2 SketchUp を利用した位置決め



図 4.3 Google Earth の DEM と合成

設定：平成 21 年 1 月 22 日 午前 7 時 33 分  
場所：渥美風力発電所付近  
(愛知県田原市小塩津町)

定おける日時・時間の設定チューナーを用いて、シャドウ影響範囲と形状の変化を連続的に観測できる点である。Google Earth サーバをリンクして、周辺地域、及び、天空の光環境変化も同期させて見ることができる。シャドウ影響時間は、最長でも 30 分程度であることを映像で確認できた。本文 2 節に示したシャドウ影響時間とシャドウ変形の推計は、Google Earth によっても妥当性が確認された。第 2 番目の利点は、カメラ移動によって、他地点の影響も観察可能になる点である。そして、第 3 番目の利点として、シミュレーション結果のネット共有が可能になった点がある。情報共有には、シーンファイルを共有する方法と、Google Earth サーバへアップロードする 2 つの方法がある。環境影響評価結果の公開という意味では、後者の方法が望ましい。

## 5. 結語

風力発電サイトの大規模化や、発電サイトの住宅地

への接近などの最近の傾向により、日本でもシャドウ問題が顕在化してきた。風力発電機は上部にロータを置く特殊な構造と、風向によって回転面方向を変えて回転運動する特性から、シャドウ影響評価の難しい建築物である。本研究では、2 つの評価方法を提案した。

シャドウ影響時間の推計では、風向観測データを用いてシャドウの変形を予測する方法を提案した。正対モデルからのズレ角度補正だけで、影響時間合計は 40% 程度減少した。このほかに、風速や大気圧、日射量などの気象データを用いた推計を進めれば、影響時間合計はさらに減る可能性が高い。建築物の日影評価方法の安易な適用については、慎重であるべきである。シャドウ影響評価の手法として、Google Earth の利用を提案した。シャドウ影響の視覚化が簡単で、しかも、ネットを通じて環境影響情報を広く住民に提供できるという点でもすぐれた方法であると考え